



# Vom realen zum virtuellen Reifen

## Reifenmodellparametrierung

An die Fahrdynamiksimulation werden mittlerweile höchste Ansprüche hinsichtlich Modellgenauigkeit und Belastbarkeit der Prädiktionsergebnisse gestellt. Hierzu werden komplexe Handling-Reifenmodelle eingesetzt, die auf Basis hochgenauer Reifenmessungen parametrierung werden müssen. Bei der IABG wird ein moderner Flachbahn-Reifenprüfstand methodisch in den Parametergenerierungsprozess eingebunden – von der Prüfprozedurerstellung bis hin zum Parameterabgleich.

## 1 Einleitung

Ein integraler Bestandteil der modernen Reifenentwicklung ist die hochgenaue Messung der Reifencharakteristik und die Weiterentwicklung von Prüfmethoden auf Reifenprüfständen. Im Vergleich zur konventionellen Reifenvermessung bieten moderne Flachbahn-Reifenprüfstände signifikante Vorteile hinsichtlich der Abbildungsgenauigkeit des Reifen-Fahrbahn-Kontakts, des möglichen Einsatzbereiches und der Flexibilität bei der Prüfprozedurgestaltung.

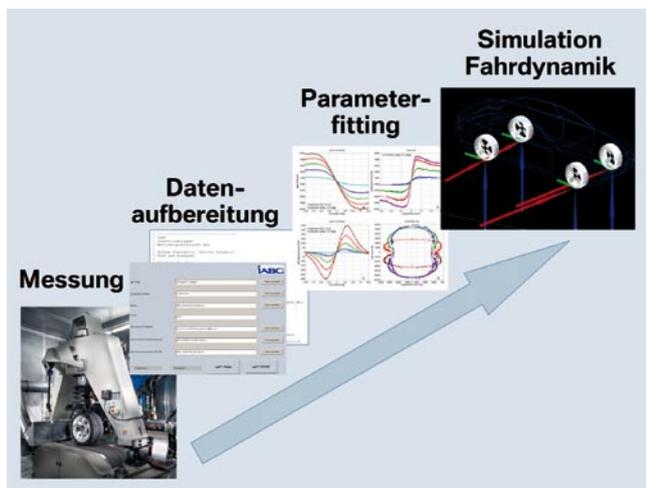
Sowohl bei Fahrzeug- als auch bei Reifenherstellern ist der Trend feststellbar, aufwändige Reifenentwicklungsschleifen, von der realen Erprobung auf der Straße hin zu virtuellen Prototypen, in die Simulation zu verlagern. Eine hohe Modellgenauigkeit insbesondere des Reifenmodells, das für die Analyse des Reifeneinflusses auf Fahrdynamik und Komfort notwendig ist, wird vorausgesetzt und kann bislang durch die konventionellen Reifenmessverfahren nicht ausreichend gewährleistet werden. So bieten Trommelprüfstandsversuche möglicherweise Kostenvorteile, bilden aber durch den veränderten Latsch die Verhältnisse zwischen Reifen und Fahrbahn nur unzureichend ab. Messtrailer hingegen weisen Defizite bezüglich der Reproduzierbarkeit aufgrund stets wechselnder Umgebungsbedingungen wie Temperaturen und Reibwerte auf. Durch die Einbin-

dung des Flachbahn-Reifenprüfstandes hingegen können fahrdynamische Kenngrößen des Reifens reproduzierbar ermittelt und Korrelationen zwischen subjektiven und objektiven Auslegungskriterien identifiziert werden.

Als substanzieller Teil des Reifenentwicklungsprozesses für verschiedene Fahrzeug- und Reifenhersteller wurde bei der IABG ein durchgängiger Prozess zur Reifencharakterisierung etabliert, mit dem Reifendatensätze für fahrdynamische Anwendungen generiert und konsequent auf die Anforderungen der Fahrdynamiksimulation zugeschnitten werden. Im Folgenden soll Einblick in das Prüfstandskonzept, das Messverfahren, die Datenaufbereitung und das Parameterfitting eines „Magic-Formula“-Reifendatensatzes [1] unter Verwendung des Parameterfitting-Programms „MF-Tool“ [2] gegeben werden.

## 2 Reifendatengenerierungsprozess am Flachbahn-Reifenprüfstand

Die schematische Darstellung in **Bild 1** soll den beschriebenen Prozess veranschaulichen. Basis sind Messungen am Flachbahn-Reifenprüfstand, dessen Messdaten aufbereitet und dem eigentlichen Parameterfitting zur Verfügung gestellt werden. Die Parameterfitting-Routine generiert einen Reifenparameterdatensatz, der wiederum in den Simulationsmodellen verwendet wird.



**Bild 1:** Schematische Darstellung des Reifendatengenerierungsprozesses für die Fahrdynamiksimulation

## Die Autoren



Dipl.-Ing. (FH)  
**Alexander Schmid**  
ist Simulations- und Fahrdynamikexperte bei der IABG mbH, Bereich Tests und Analysen in Ottobrunn.



Dipl.-Ing. (FH)  
**Stefan Förtsch**  
ist Projektleiter am Flachbahn-Reifenprüfstand bei der IABG mbH, Bereich Tests und Analysen in Ottobrunn.

**Tabelle 1:** Technische Daten zum Flachbahn-Reifenprüfstand [3]

Maximale Einstellungen	Größe	Genauigkeit	Einheit
Reifengröße	910	± 0,25	mm
Reifenbreite	450	± 0,25	mm
Bandgeschwindigkeit	250	± 1	km/h
Spindelgeschwindigkeit	3500	± 12,5	rpm
Raddrehmoment	2800	± 20	Nm
Schräglaufwinkel	± 30	± 0.01	deg
Verstellgeschwindigkeit	50	± 1	deg/s
Sturzwinkel	-12 bis 45	± 0.01	deg
Verstellgeschwindigkeit	5	± 0.1	deg/s
Radlast	25000	± 1 %	N
Verstellgeschwindigkeit	300	± 3	mm/s
Reifenfülldruck	700	± 3	kPa
Maximale Messgrößen	Größe	Genauigkeit	Einheit
Längskraft F <sub>x</sub>	10000	± 1 %	N
Seitenkraft F <sub>y</sub>	15000	± 1 %	N
Kippmoment M <sub>x</sub>	10000	± 1 %	Nm
Rückstellmoment M <sub>z</sub>	3000	± 5	Nm
Raddrehmoment T <sub>w</sub>	2800	± 20	Nm

### 3 Konzeption des Flachbahn-Reifenprüfstands

Mit dem von der IABG betriebenen Flachbahn-Reifenprüfstand [3] der neuesten Generation lassen sich Reifen im Pkw-, Motorrad- und Motorsportbereich vermessen. Der Prüfstand ermöglicht einen Betrieb bis zu einer Geschwindigkeit von 250 km/h und bildet Fahrmanöver (Radlast, Schräglauf, Sturz, Antreiben, Bremsen) hochdynamisch ab, **Tabelle 1**. Neben der kinematischen Reifenführung bietet der Prüfstand im kraftgeregelten Modus die Möglichkeit, auf Messfahrten über Radmessnaben ermittelte Kräfte und Momente direkt als Sollvorgaben einzuspielen.

Der Reifen läuft auf einem zirka 0,7 mm dünnen Edelstahlband, das mit unterschiedlich rauen Oberflächen beschichtet werden kann. Unter dem Laufband befindet sich ein hydrodynamisches Wasserlager, das die Radlasten aufnimmt und damit eine ebene und temperierte Aufstandsfläche garantiert. Der Fülldruck im Reifen wird während der Messungen geregelt. Mithilfe von Ad-

aptersystemen werden Positionierungsoffsets ausgeglichen und ermöglichen somit den Einsatz aller gängigen Fahrzeugfelgen. Die Reifenkräfte und Momente werden über eine Mehr-Komponenten-Kraftmessdose ermittelt. Über einen separaten Antrieb kann das Rad angetrieben und gebremst werden.

Die Messungen erfolgen unter Laborbedingungen. Störende Einflüsse wie Temperatur- und Reibwertschwankungen sind daher minimiert. Die Raumluft in der Prüfkammer wird auf 23 °C geregelt. Ferner dient der Prüfraum zur Vorkonditionierung der Reifen. An die Metallbandbeklebung werden höchste qualitative Anforderungen gestellt (Makro- und Mikrorauigkeiten, Reifenverschleiß, Geschwindigkeitsbeständigkeit). Die geforderte Rauigkeit einer trockenen Straßenoberfläche wird mit einem speziellen Nachbearbeitungsverfahren, das in Vorversuchen mit einem Reibwertmessverfahren validiert wurde, gewährleistet. Damit sind die Voraussetzungen für reproduzierbare Messungen, die unablässig für einen kontinuierlichen Entwicklungsprozess sind, erfüllt.

### 4 Messverfahren und Messprozeduren

Bei der Erstellung von Messprozeduren sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Entwicklungsschwerpunkte (Traktion, Bremsweg, Geradeauslauf etc.)
- Reifenmodell
- Messgrößen
- Leistungsbereich des Prüfstands
- Reifentemperatur
- Reifenverschleiß
- Versuchsablauf.

Daraus leitet sich ein Messplan als sequenzielle Abfolge von definierten Betriebszuständen ab. Der eigentlichen Versuchsequenz sind Konditionierungssequenzen (zum Beispiel „Warm-Up“ oder „Cool-Down“) vor- beziehungsweise nachgeschaltet. Bei der Messprozedur zur „Magic-Formula“-Parameterermittlung, auf die nachfolgend näher eingegangen wird, muss beispielsweise besonders darauf geachtet werden, die Einflussfaktoren Reifenverschleiß und Reifentemperatur konstant zu halten.

In **Tabelle 2** ist der standardisierte „Magic-Formula“-Messplan dargestellt. Für die gesamte Messkampagne werden fünf Reifen benötigt. Die Reifen eins bis drei werden für Manöver mit Antriebs- und Bremschlupf verwendet. Reifen vier und fünf sind für frei rollende Messungen vorgesehen. In den einzelnen Messroutinen werden jeweils definierte Betriebszustände (Radlasten, Geschwindigkeit, Schräglauf und Sturzwinkel, Längsschlupf, Fülldruck) angefahren. Beispielsweise werden bei der Messroutine „Pure Longitudinal“ deren Kombinationen über den Längsschlupf aufgezeichnet. Für einen Fülldruck und eine Geschwindigkeit ergeben sich damit 15 verschiedene Betriebszustände. Die Gesamtvermessung für einen Reifenparametersatz erfordert insgesamt zirka 200 Einzelmessungen.

Ebenfalls in **Tabelle 2** ersichtlich sind vier verschiedene Normalkraftniveaus. Die ersten drei Vertikalkraftstufen sind typischerweise vorgegeben (zum Beispiel 800 N, 3200 N und 4800 N), um eine direkte Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Messprozeduren und Messkampagnen zu gewährleisten. Das vierte Vertikalkraftniveau, mit dem Kürzel „max“ gekennzeichnet, ist variabel und reifentypabhängig. Es wird vor Festlegung der Messprozedur iterativ am Prüfstand ermittelt.

**Tabelle 2:** Messplan zur Ermittlung der „Magic-Formula“-Parameter

Testplan für einen Pkw-Reifen				
Angetriebenes Rad			Frei rollendes Rad	
Antreiben	Bremsen	Antreiben/Bremsen		
Reifen 1	Reifen 2	Reifen 3	Reifen 4	Reifen 5
Aufwärmen/Einfahren des Reifens				
Abstimmung der Versuchsanlage				
Reine Längskraftmessung	Reine Längskraftmessung	Reine Längskraftmessung Bremsen FZmax	Seitenkraftmessung	Statische Federsteifigkeitsmessung
Kombinierte Längskraftmessung FZ1	Kombinierte Längskraftmessung FZ1	Kombinierte Längskraftmessung Bremsen FZmax	Sinusanregung	
Kombinierte Längskraftmessung FZ2	Kombinierte Längskraftmessung FZ2	Reine Längskraftmessung Antreiben FZmax	Vertikalsteifigkeitsmessung	
Kombinierte Längskraftmessung FZ3	Kombinierte Längskraftmessung FZ3	Kombinierte Längskraftmessung Antreiben FZmax		

Ziel ist es, den Arbeitsbereich des Reifens möglichst vollständig zu erfassen.

Trotz weitgehender Elimination von Einflussfaktoren hat sich in Hinblick auf einen reproduzierbaren Fittingprozess gezeigt, dass Wiederholungsmessungen für Teilbereiche der Messkampagne unerlässlich sind. Insbesondere gilt dies für komplexe Betriebsbereiche (zum Beispiel Übergang Haften, Gleiten).

Die Auswahl der aufzuzeichnenden Messkanäle und deren Abtastfrequenz erfolgt individuell im Hinblick auf die zu erfassenden dynamischen Effekte und die Handhabbarkeit der Dateigrößen der Messergebnisse. Im Normalfall werden derzeit 32 Messgrößen mit einer Abtastzeit von bis zu 1 ms aufgezeichnet. **Tabelle 3** zeigt die für das Parameterfitting erforderlichen Kanäle.

### 5 Konvertierungs- und Auswertesoftware

Erst durch die Verwendung einer entsprechenden Konvertierungs- und Auswertesoftware wird der Flachbahn-Reifenprüfstand zur leistungsstarken Entwicklungsplattform. Sie stellt das Bindeglied zwischen Messrohdaten, Simulation und Reifenentwicklung dar. Bei der IABG wurde hierzu eine modulare Programmumgebung unter „MATLAB“ aufgebaut, die über eine grafische Bedienoberfläche verfügt. Die Software greift sowohl auf die Versuchssteuerdateien (Input) als auch auf die erzeugten Messdatendateien (Output) zurück. Somit wird eine umfassende Versuchsauswertung und -dokumentation sichergestellt. Eine flexible Anpassung, aber auch eine Standardisierung von im-

mer wiederkehrenden Aufgaben, sowohl in der Datenkonvertierung als auch bei der Plotgenerierung, ist somit gegeben. Weitere Funktionalitäten sind zudem vorhanden, von einer automatisierten Messdatenspeicherung bis hin zur Messberichtserstellung. Als Ergebnis stehen beispielsweise „TYDEX“-kompatible Daten [4] zur Verfügung.

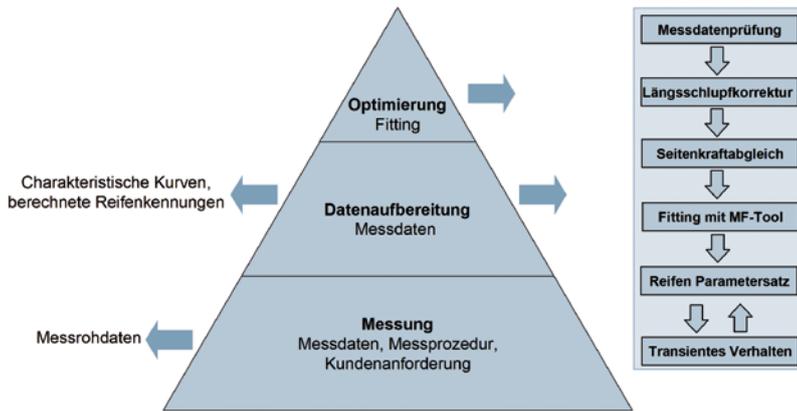
Durch die Auswertesoftware wird der gesamte Datenkonvertierungsprozess aufgezeichnet und dokumentiert. Daraus resultiert eine transparente Dokumentation der Zeitrohdatennachbearbeitung. Abgelegt werden unter anderem zugrundeliegende Benutzereinträge, verwendete Ablaufprogramme sowie sämtliche Steuerparameter und Filtereinstellungen.

Hinsichtlich des Parameterfittingprozesses mit „MF-Tool“ werden im Folgenden die abgerufenen Funktionalitäten des IABG-Datenkonverters stichpunktartig dargestellt:

- Konvertierung und Export der Einzelmessungen im „TYDEX“-Format (Header, Daten-, Parameterbereich)
- digitales Filtern der Messgrößen
- Detektieren und Ausschneiden auswertungsrelevanter Messbereiche
- Separieren und Kombinieren von Einzelmessungen
- Messauswertung von Sondergrößen (vertikale Reifensteifigkeit, kinematischer Rollradius, „Vorab“-Einlauflängen)
- Koordinatentransformationen
- Messkanalselektion
- Kontroll- und Ergebnisploterstellung
- Konvertierungsbericht.

**Tabelle 3:** Eingangsgrößen für das „Magic-Formula“-Parameterfitting

Messkanäle für „Magic Formula“		
Kanal	Beschreibung	Einheit
MEASNUMB	Messpunktnummer	1
SLIPANGL	SA Schräglaufwinkel	rad
INCLANGL	IA Sturzwinkel	rad
LONGSLIP	SR Längsschlupf	%
FX	FX Längskraft	N
FYW	FY Seitenkraft_ISOW	N
FZW	FZ Vertikallast_ISOW	N
MZW	MZ Kippmoment_ISOW	Nm
MXW	MX Rückstellmoment_ISOW	Nm



**Bild 2:** Ablauf Messdatenerfassung, Aufbereitung und Parameteroptimierung

Zur Veranschaulichung ist der Konvertierungs- und Auswerteprozess in **Bild 2** im Überblick dargestellt.

**6 Aspekte beim Fitten eines „Magic-Formula“-Datensatzes**

Anhand einzelner Datenaufbereitungsschritte wird gezeigt, in welcher Form das Parameterfitting-Programm „MF-Tool“ in den Parameterfitting-Prozess eingebunden ist, Bild 2. Zu Beginn sind die aufbereiteten Prüfstandsmessdaten zu plausibilisieren; jede Messung wird hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit sowie ihres Gültigkeitsbereichs überprüft. Ge-

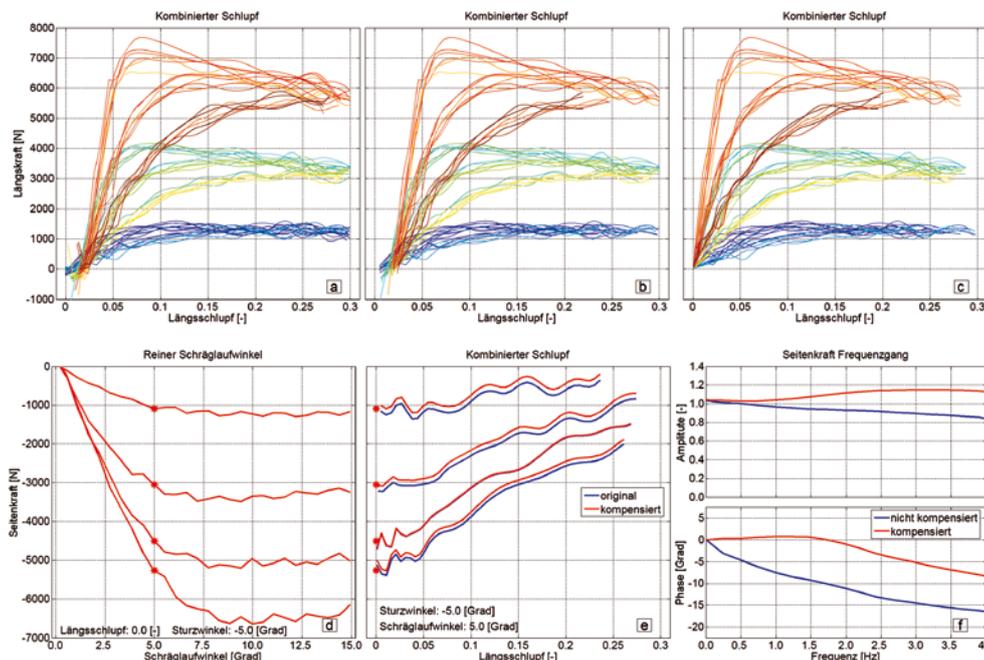
gebenenfalls werden einzelne Messungen nicht verwendet, beziehungsweise deren Gültigkeitsbereich eingeschränkt. Die Sichtung der Messungen geschieht halbautomatisiert, das heißt das Auswertungsprogramm ermittelt einen Vorschlag für die Messungsaufbereitung. Dieser muss durch den Anwender jeweils bestätigt, beziehungsweise korrigiert werden, **Bild 3** a und b.

Die Bezugsgröße für die Filterung und Darstellung der Messgrößen (Kräfte, Momente) ist der Reifenlängsschlupf. Das indirekte Verfahren [5] zur Bestimmung des Längsschlupfes am Prüfstand bringt eine systematische Abweichung mit sich, das heißt schlupfabhängige Messgrößen

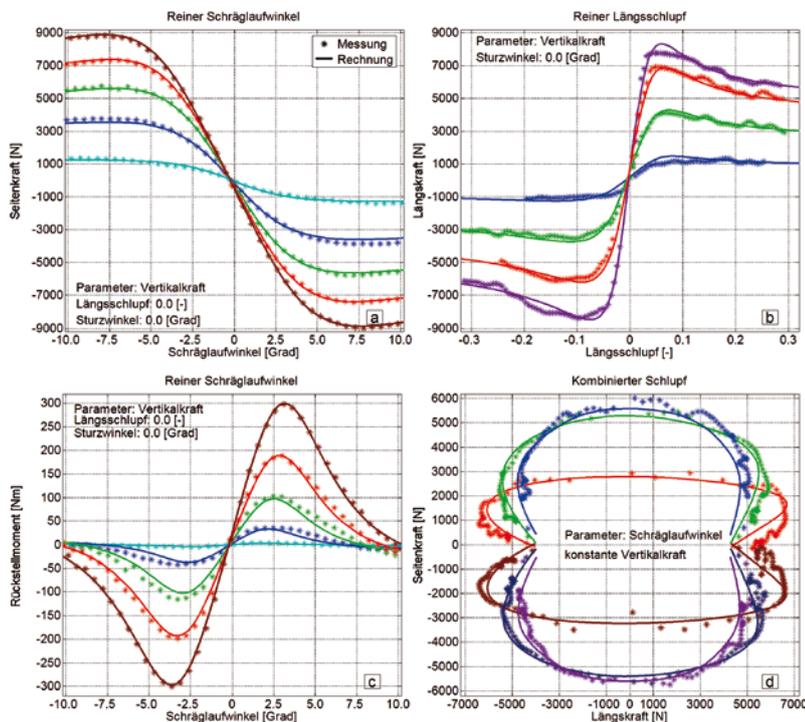
zeigen ihren Ursprung nicht bei Längsschlupf null. Entsprechend der Modellvorstellung, dass bei einem Längsschlupf gleich null weitere Größen, zum Beispiel die Längskraft, ebenfalls gleich null sind, werden vertikalkraftabhängige Offsetkorrekturen durchgeführt, Bild 3, b und c. Die erforderlichen Korrekturen liegen typischerweise im Bereich bis zu 3 %.

Zusätzlich muss im Sinne einer konsistenten Datenauswertung eine Anpassung der Radseitenkräfte erfolgen: Anpassung der Seitenkräfte bei kombiniertem Schlupf auf die Seitenkräfte bei reinem Schräglaufwinkel. Dies ist der Modellvorstellung geschuldet, dass der kombinierte Lastfall in den jeweils nicht-kombinierten Lastfall überführt werden kann. Dieses Verfahren gewährleistet eine konsistente Erfassung des Seitenkraftabfalls in Abhängigkeit von der Längskraft und damit letztlich eine genauere Längskraftsensitivität im Gesamtfahrzeugmodell. Die hierfür erforderlichen Seitenkraftkorrekturen liegen im Bereich bis zu 4 % des jeweiligen Normalkraftniveaus, Bild 3, d und e.

Über das Fitting der quasistationären Reifenkennungen hinaus ist ein präziser Abgleich des dynamischen Ansprechverhaltens der Kräfte in Längs- und Querrichtung wichtig. In der „Magic-Formula“ ist ein dynamisches Ersatzmodell in Form eines verzögernden Übertragungsverhal-



**Bild 3:** Schematische Darstellung der Messdatenaufbereitung für das Parameterfitting



**Bild 4:** Exemplarische Ergebnisdarstellung eines gefitteten Datensatzes

tens erster Ordnung (PT1) enthalten, das eine besondere Gewichtung der Messungen für den relevanten Reifenbetriebsbereich erfordert. Ausschlaggebend hierfür sind die Größen Fahrgeschwindigkeit, Vertikalkraft, Lenkwinkelbereich und Lenkwinkelamplitude. Die Bestimmung der PT1-Parameter erfolgt durch Simulation des bis dato generierten Reifendatensatzes. Die Optimierung des Seitenkraftverlaufs wird beispielsweise anhand des Sinuslenkmanövers (Tabelle 2: „Sinusanregung“) unter Vorgabe des Lenkwinkels durchgeführt, Bild 3 f.

## 7 Zusammenfassung

Mit dem Einsatz des hochmodernen Flachbahn-Reifenprüfstands ist die Vision verbunden, dem Fahrzeugentwicklungsprozess einen bereits weitgehend „fertigen“ Reifen mit den geforderten Fahr- und Handlingeigenschaften frühzeitig zur Verfügung zu stellen. Mit dem Prüfstand werden qualitativ und quantitativ hochwertige Reifenmessungen unter reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt, die den Ausgangspunkt für die Generierung von Reifenmodell Datensätzen für die Fahr-dynamiksimulation bilden.

Für das vorgestellte Verfahren zur Generierung von „Magic-Formula“-Parametern ist neben der Messeinrichtung die Mess- und Auswertemethodik von entscheidender Bedeutung. In den Messungen werden beispielsweise Verschleiß- und Temperatureinflüsse kompensiert sowie alle fahrdynamisch relevanten Betriebszustände abgedeckt. Zur Aufbereitung der Messdaten wird eine umfassende Auswertesoftware eingesetzt, die es ermöglicht, die Messdaten für das Fitting entsprechend aufzubereiten und zu optimieren. Am Beispiel des kommerziellen Programms „MF-Tool“ [2] werden aus den aufbereiteten Messdaten die Parameter für das Reifenmodell „Magic Formula“ [1] bestimmt, Bild 4.

## 8 Ausblick

In der zukünftigen Reifenentwicklung ist damit zu rechnen, dass nach Validierung und Standardisierung der Prüfprozeduren zunehmend die Reifenparameteridentifikation (zum Beispiel auch Fitting und Auswertung) vom Fahrzeughersteller zum Reifenhersteller oder zu Dienstleistungspartnern verlagert wird. Das heißt, dass neben dem eigentlichen Reifen der Reifenher-

ler zusätzlich die zugehörigen Reifenmodell Datensätze beziehungsweise Reifenparameter liefern muss.

Durch den Einsatz des Flachbahn-Reifenprüfstands in der beschriebenen Auswertenumgebung lassen sich für Reifen- und Fahrzeughersteller, aber auch Dienstleistungspartner im Simulationsbereich, Kosten und vor allem Entwicklungszeit einsparen. Reifenmessungen auf dem Flachbahn-Reifenprüfstand werden zukünftig Standard sein, um Messergebnisse und Reifenmodellparameter vergleichbar zu machen. Neben der Ermittlung von Daten für die Simulation werden Reifen charakterisiert und verglichen. Darüber hinaus lassen sich Fahr-dynamikmanöver abbilden und so die Leistungsfähigkeit von Reifen im Grenzbereich analysieren.

Im Rahmen einer konsequenten Erweiterung des Anwendungsbereiches werden am Flachbahn-Reifenprüfstand bereits Schlagleistenversuche und „Footprint“-Messungen durchgeführt. Diese dienen unter anderem dazu, für Reifenmodelle aus dem Komfortbereich wie beispielsweise „RMOD-K“ [6] oder „FTire“ [7] Parameter und Kenngrößen zu bestimmen. Die Konvertierungs- und Auswertesoftware wird mit dem Ziel, auf Knopfdruck konsistente Parametersätze auch für Komfortreifenmodelle zu liefern, erweitert.

## Literaturhinweise

- [1] Pacejka, H. B.; Besselink, I. J. M.: Magic Formula Tyre Model with Transient Properties; In: Vehicle System Dynamics; Nr. Supplement 27, 1997, S. 234–249
- [2] MF-Tool 3.0, User Manual; TNO Automotive; Helmond 2004
- [3] Brochure; Flat Trac® Tire Test system; MTS System Corporation; Eden 2005
- [4] Unrau, H.-J.; Zamov, J.: TYDEX-FORMAT, Description and Reference Manual Release 1.3, TYDEX Workshop; Universität Karlsruhe 1997
- [5] Operation and Control Software Reference, Flat-Trac III Tire Test Systems; MTS System Corporation; Eden 2005
- [6] Oertel, Ch.: Messungen zur Parameterbestimmung des Modellsystems RMOD-K; FH Brandenburg 2003
- [7] Gipser, M.: FTire Parameterization, Proposed Measurement and Data Processing Procedures; HS Esslingen 2008

Download des Beitrags unter  
[www.ATZonline.de](http://www.ATZonline.de)

**ATZ**  
online

**ATZ**

Read the English e-magazine.  
Order your test issue now:  
[SpringerAutomotive@abo-service.info](mailto:SpringerAutomotive@abo-service.info)